

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Губашова Валентина Євгенівна

УДК 624.1

**ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
СТРУМЕНЕВОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ В СКЛАДНИХ ГЕОТЕХНІЧНИХ
УМОВАХ**

Спеціальність 05.15.09 – геотехнічна і гірнича механіка

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі геоінженерії Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Міністерства освіти і науки.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Зуєвська Наталя Валеріївна**, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", професор кафедри геоінженерії.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Сдвижкова Олена Олександрівна**, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", завідувач кафедри вищої математики;

доктор технічних наук, доцент **Дреус Андрій Юлійович**, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, завідувач кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу.

Захист відбудеться "8" квітня 2021 року о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.22 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" за адресою: 03056, м. Київ-56, вул. Борщагівська, 115, ауд. 511.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" за адресою: 03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий "5" березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент

В.В. Вапнічна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. За інтенсивного ритму забудови міста постає питання безпечного виконання будівництва на прилеглих територіях до існуючих будівель. Саме технологія струменевої цементації характеризується відсутністю ударних і вібраційних впливів, а малогабаритні бурові машини дозволяють проводити роботи в обмеженому просторі, завдяки чому технологія набула поширення в сучасному будівництві.

Не зважаючи на широке застосування технології, існує багато питань, які залишаються недостатньо висвітлені в дослідженнях та в нормативних документах. Потребує обґрунтування вибір раціональних технологічних параметрів для отримання очікуваних ефективних діаметрів ґрунтоцементних колон, дослідження взаємозв'язку параметрів, потребують уточнення діапазони очікуваної міцності ґрунтоцементу струменево-цементацийних елементів, вивчення впливу цих елементів на оточуюче ґрунтове середовище та застосування технології струменевої цементації в складних інженерно-геологічних умовах.

Зазначені питання обумовлюють потребу удосконалення методики струменевої цементації з урахуванням особливостей геотехнічних характеристик ґрунтових масивів, що підкреслює **актуальність окресленого науково-практичного завдання** та потребує подальших досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі геоінженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського відповідно до НДР: "Наукові основи ресурсозберігаючих технологій гірництва та геотехнічного будівництва" (№ ДР 0115U005398).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення технології струменевої цементації через встановлення закономірностей формування ґрунтових зон з поліпшеними фізико-механічними характеристиками.

Вказана мета досягається вирішенням наступних **завдань**:

- аналіз існуючих методик розрахунку робочих параметрів технології струменевої цементації в зв'язку з геометричними характеристиками проєктованих ґрунтоцементних елементів;
- встановлення закономірностей формування зон з поліпшеними фізико-механічними параметрами при використанні струменевої цементації;
- експериментальне дослідження напружено-деформованого стану ґрунтового масиву підсиленого елементами струменевої технології;
- виконання числового моделювання процесу підсилення ґрунтового масиву основи існуючої будівлі ґрунтоцементними елементами круглого перерізу, використовуючи програмні геотехнічні комплекси, основані на методі кінцевих елементів;
- розробка методики розрахунку діаметру ґрунтоцементної колони в залежності від технологічних параметрів.

Об'єкт дослідження – процеси формування ґрунтоцементних колон в ґрунтових масивах.

Предмет дослідження – технологічні параметри армування масивів за участі ґрунтових зон підвищеної щільності в системі струменево-цементацийних елементів.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач у роботі використовувались сучасні методи наукових досліджень: аналіз і узагальнення сучасних досягнень з удосконалення технології струменевої цементації для армування ґрунтових масивів; експериментальні дослідження в натурних умовах для визначення зміни фізико-механічних характеристик ґрунту після армування; методи математичної статистики – для обробки експериментальних даних та встановлення залежності розподілу міцності ґрунту в просторі навколо ґрунтоцементного елементу; математичне моделювання МКЕ – для встановлення залежності зміни технологічних параметрів від геометричних параметрів струменево-цементацийних елементів; техніко-економічний аналіз – для оцінки доцільності практичної реалізації отриманих результатів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступних наукових положеннях, в яких вперше:

- на підставі теоретичних досліджень отримано експоненціальні залежності діаметра ґрунтоцементного елементу круглого перерізу від енергії високонапірного струменя цементного розчину і швидкості підйому робочого інструменту, що дозволяють визначити очікуваний діаметр колони відповідно до технологічних параметрів обладнання;
- на основі порівняльного аналізу результатів експериментальних і теоретичних досліджень встановлено коригуючі коефіцієнти для співвідношення розрахункового та фактичного діаметрів колони, які складають для піску і супіску $K=0,8$, для суглинку $K=0,9$, що дозволяє визначити реальний діаметр ґрунтоцементної колони в різних інженерно-геологічних умовах;
- на підставі математичного моделювання та експериментально підтверджено закономірності формування в ґрунтових масивах зон з поліпшеними фізико-механічними параметрами в міжколонному просторі, що дозволяє зменшити на 15 % кількість ґрунтоцементних елементів при підсиленні ґрунтової основи існуючих будівель.

Практичне значення отриманих результатів роботи. Практичні результати роботи полягають в наступному:

- розроблено рекомендації щодо співвідношення швидкості підйому робочого інструмента залежно від проектного значення діаметра ґрунтоцементної колони з урахуванням взаємозв'язку між технологічними параметрами – енергією і потужністю струменя та технічними параметрами обладнання – діаметром сопел на гідромоніторі і потужністю високонапірного насоса для різних типів ґрунтів;

- розроблено та промислово випробувано методику розрахунку діаметра ґрунтоцементної колони з урахуванням ґрунтових зон з поліпшеними фізико-механічними параметрами в міжколонному просторі;
- удосконалено методику комп'ютерного моделювання управління напружено-деформованим станом основи будівлі під час її підсилення струменево-цементацийними елементами з урахуванням складних геотехнічних умов.

Розроблену методику розрахунку параметрів ґрунтоцементних елементів, виконаних за технологією струменевої цементациї, прийнято до впровадження україно-французьким спільним підприємством ТОВ СП "Основа-Солсиф", компанією "Геопік" та ДП НДІБК, використано в навчальному процесі кафедри геоінженерії, а також рекомендується підприємствам з проектування та виконання будівельних об'єктів з улаштуванням ґрунтоцементних елементів.

Особистий внесок здобувача в одержанні наукових та практичних результатів, що викладені у дисертаційній роботі.

Дисертація є самостійною роботою автора. Формулювання мети роботи, вибір методів дослідження, обробка експериментальних даних та встановлення теоретичних залежностей виконані безпосередньо дисертантом під контролем наукового керівника. Автору належить ідея постановки задачі, безпосередня участь і керівництво у проведенні досліджень, інтерпретація результатів.

Основні наукові положення та результати досліджень опубліковані у фахових виданнях, а також доповідались на міжнародних та всеукраїнських конференціях.

У працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача є наступним: [2, 10] – дослідження використання струменевої цементациї для підсилення ґрунтових основ фундаментів існуючих будівель та для вирішення різноманітних задач в міському будівництві, [3, 8, 12] – дослідження напружено-деформованого стану масиву за допомогою геотехнічних розрахункових комплексів, [4] – дослідження впливу виконання ґрунтоцементних елементів на оточуюче ґрунтове середовище, [5, 7] – дослідження застосування струменевої цементациї в складних геотехнічних умовах. Решту робіт [1, 6, 9, 11, 13] написано без співавторів.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та окремі результати роботи доповідались та обговорювались на: 71-й міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми и перспективы развития железнодорожного транспорта" (Дніпропетровськ, 2011); третій міжнародній науково-практичній конференції "Застосування передових технологій в цивільному та промисловому будівництві" (Київ, 2012); восьмій всеукраїнській науково-технічній конференції "Механіка ґрунтів, геотехніка та фундаментобудування", Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, 2013), міжнародній науково-технічній конференції "Інноваційні технології в будівництві", Вінницький національний технічний університет (Вінниця, 2014), третій Всеукраїнській науково-технічній конференції "Енергоефективність у будівництві. Сучасні конструктивні системи, ефективні матеріали та інженерне обладнання",

ДП НДІБК (Київ, 2017), на міжнародних конференціях Soletanche Bachy Group Designers meeting (Лондон, Великобританія, 2008; Будапешт, Угорщина, 2011; Бухарест, Румунія, 2017) і міжнародній науково-технічній конференції "Геотехніка Беларусі: наука і практика" (Мінськ, Білорусь, 2013), та на наукових семінарах кафедри геоінженерії Національного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 13 наукових працях, у тому числі, 9 статей у фахових виданнях (з них 1 стаття в періодичному науковому виданні іншої держави, яка входить до ОЕСР та Європейського Союзу), 1 стаття в закордонному періодичному виданні, 2 тези доповідей в збірниках матеріалів міжнародних конференціях, 1 стаття в інших виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 193 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, трьох додатків, списку використаних літературних джерел, який містить 106 найменувань. Основний текст викладено на 132 сторінках друкованого тексту, містить 115 рисунків, 26 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено новизну та практичну цінність, викладено основні положення, що виносяться на захист, відомості про апробацію та публікацію основних результатів роботи, показано структуру та її об'єм.

Перший розділ присвячено аналізу теоретичних напрацювань і експериментальних досліджень технології струменевої цементації.

Дослідження явища руйнування природної структури та перемішування ґрунту методом струменевої цементації були проведеними вченими Miki G., Tornaghi R., Shibazaki M., Kauschinger J.L., Bell A.L., Covil C.S. і Skinner A.E., Croce P., Flora A., Modoni G., Vleeschauwer Y., Morey J., Imanishi H., Bergschneider B., російськими вченими Хасінім М. Ф., Бройдом І. І., Малініним А. Г., Ібрагімовим М. Н. та вченими України, що працюють над питаннями створення ґрунтоцементу: Зоценко М. Л., Винніковим Ю. Л., Киричеком Ю. А. і Комиссаровим Г. В., Власовим С.Ф.

Аналіз попередніх досліджень технології струменевої цементації показав, що не дивлячись на те, що технологія впроваджується з 70-х років минулого століття, є ще багато питань, які мають бути дослідженими: зв'язок технологічних параметрів з параметрами ґрунтоцементного елементу, вплив на оточуюче ґрунтове середовище, тощо.

Більшість сучасних українських досліджень ґрунтоцементу спрямована на бурозмішувальні технології, в яких розглянуті і широкий діапазон ґрунтів, і чисельні значення міцності отриманого матеріалу. В іноземній технічній літературі в більшості випадків на графіках міцнісних характеристик ґрунтоцементу зустрічаються типи ґрунтів, що не розповсюджені в Україні. Під

час виконання проєкту з застосуванням струменево-цементацийних елементів на території нашої країни в більшості випадків неможливо знайти значення очікуваних характеристик ґрунтоцементного матеріалу, що формує завдання аналізу та впорядкування більшості чисельних експериментальних значень характеристик матеріалу елементів, що виконані за струменевою технологією, в таких основних типах ґрунтів, як піски, супіски та суглинки.

Існуючі методики розрахунків ґрунтоцементних елементів переважно направлені на отримання таких даних, як витрати цементного розчину під час виконання струменево-цементацийних елементів будь-якої конфігурації. Лише деякі автори пропонують розрахунок радіусу розмиваючого струменя, але ці методики та підходи базуються на багатьох експериментальних параметрах, які автори пропонують отримувати на будівельних майданчиках під час роботи. Тобто для інженерів-проектувальників, що не мають змоги виконати ряд експериментальних досліджень, застосування цих методик неможливе. В зв'язку з цим постало завдання розробки методу розрахунку геометричних параметрів ґрунтоцементного елемента та адаптування його до вітчизняних ґрунтових умов, що дозволить його проектування без безпосереднього доступу до будівельного майданчика.

Базуючись на факті відсутності досліджень впливу виконання струменево-цементацийних елементів на оточуюче ґрунтове середовище та зіставленні даного факту з отриманими дослідними результатами в процесі робіт з підсилення ґрунтової основи існуючих будівель, постало завдання з дослідження фізико-механічних властивостей ґрунтів, що оточують ґрунтоцементні елементи з подальшим використанням отриманих значень в моделюванні підсилення будівель.

Аналізуючи літературні дані стосовно ґрунтових умов, в яких виконуються ґрунтоцементні елементи, було відмічено відсутність прикладів застосування струменево-цементацийних колон під час підсилення ґрунтових основ будівель за наявності складних інженерно-геологічних умов, наприклад, напівскельних ґрунтів. Це поставило завдання вивчення можливості застосування ґрунтоцементних колон для підсилення основ фундаментів в умовах напівскельних прошарків ґрунту, в яких виконання колон є проблематичним.

Другий розділ присвячено дослідженню взаємозв'язку технологічних параметрів струменевої цементації та розробці на основі отриманих залежностей методики розрахунку діаметра ґрунтоцементної колони.

В результаті проведених досліджень підтверджено, що всі параметри в струменево-цементацийному процесі пов'язані між собою. І всі параметри, в тій чи іншій мірі, беруть участь в реалізації емпіричних і чисельних методів оцінки діаметра ґрунтоцементного елемента.

На основі дослідних даних виконано аналіз взаємозв'язку технологічних параметрів струменевої цементації та діаметра ґрунтоцементної колони в різних типах ґрунтів. Дослідні дані розділено за типом ґрунтів - незв'язні і зв'язні: піски і гравій, супісок і суглинок. Серед технологічних параметрів

обрано наступні: тиск цементного струменя, витрати розчину, швидкість підйому інструмента та один з найважливіших параметрів – руйнівна енергія струменя.

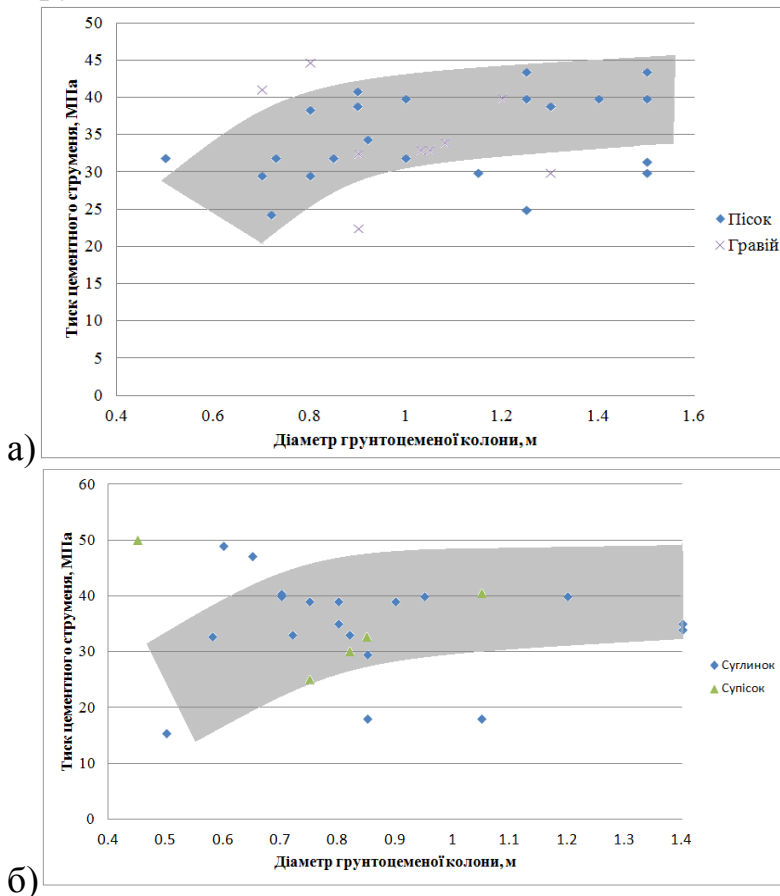


Рисунок 1 – Залежність діаметра ґрунтоцементної колони від тиску струменя: а) в незв'язних ґрунтах (пісок, гравій), б) в зв'язних ґрунтах (супісок, суглинок)

З аналізу залежності "тиск цементного струменя – діаметр" слідують наступні висновки (рис. 1):

- для однакових діапазонів тиску струменя (наприклад, 35–45 МПа) діаметри для незв'язних ґрунтів перевищують діаметри колон в зв'язних ґрунтах (1,2–1,4 м в порівнянні з 0,7–1,0 м), що пов'язано з великим опором зв'язного ґрунту до руйнування його структури високонапірним струменем цементного розчину;
- якщо для незв'язного ґрунту діапазон діаметра колон варіюється від 0,6 до 1,5 м, то для зв'язного – від 0,5 до 1,2 м, більш великі діаметри виконуються зі зменшенням таких технологічних параметрів,

як швидкість обробки ґрунту;

- область робочих параметрів тиску струменя для однокомпонентної струменевої технології для незв'язних ґрунтів – 25–45 МПа, для зв'язних ґрунтів – 30–50 МПа.

Під час дослідження залежності "витрати цементного розчину – діаметр" (рис. 2) були зроблені наступні висновки:

- діапазон зміни витрати цементного розчину для незв'язних ґрунтів – 0,13–0,25 м³/хв для діаметра колони 0,7–1,5 м, для зв'язних ґрунтів – 0,07–0,2 м³/хв для діаметра 0,6–1,0 м;
- витрати цементного розчину і швидкість підйому інструменту безпосередньо впливають на міцність ґрунтоцементного матеріалу.

В усіх описаних залежностях для однокомпонентної технології діаметри виконаних ґрунтоцементних колон в незв'язних ґрунтах перевищують максимальний діаметр в зв'язних в 1,5 рази.

Виходячи з залежностей технологічних параметрів, можна зробити висновок, що діаметр сопла керує співвідношенням між тиском і витратою струменя, тобто його потужністю. Отже, можна розрахувати діаметр сопла на гідромоніторі для того, щоб отримати тиск і витрати необхідного струменя,

беручи до уваги щільність використовуваного розчину.

Добуток тиску на витрати цементного розчину дадуть потужність струменя, який дозволить обрати висконапірний насос з відповідними робочими параметрами.

Дослідження взаємозв'язку "швидкість підйому інструмента – діаметр" (рис. 3) дало змогу зробити наступні висновки:

- одержані діаметри ґрунтоцементних колон під час обробки незв'язного ґрунту більше, ніж за таких же параметрів в зв'язному ґрунті, що пов'язано, в свою чергу, з міцністю ґрунту і опором руйнуванню;

- в незв'язних ґрунтах для діапазону діаметра 0,7–1,5 м – діапазон

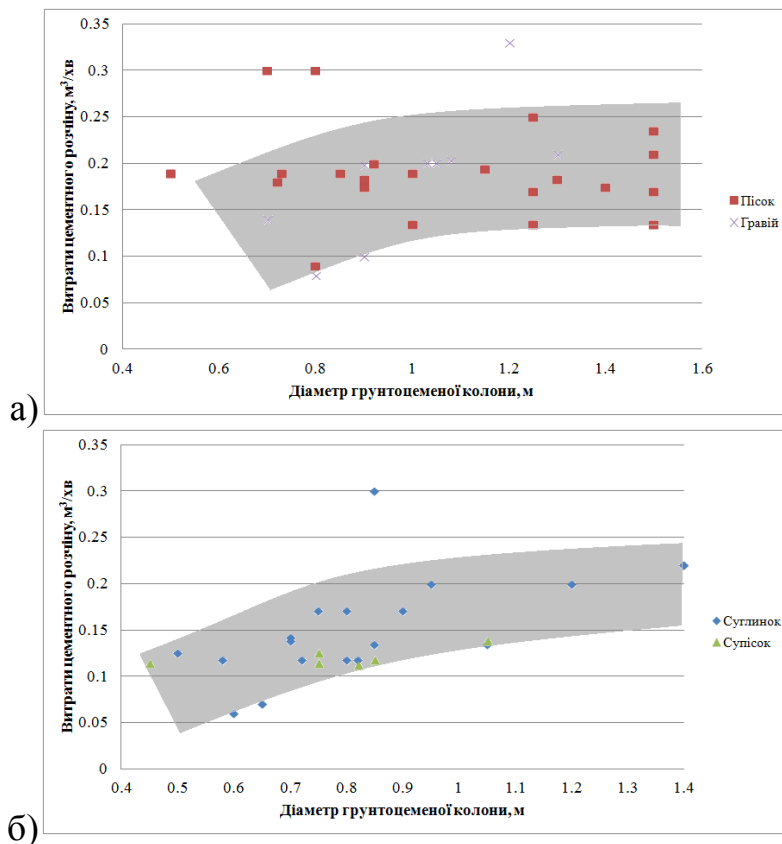


Рисунок 2 – Залежність діаметра ґрунтоцементної колони від витрат цементного розчину: а) в незв'язних ґрунтах (пісок, гравій), б) в зв'язних ґрунтах (супісок, суглинок)

швидкості підйому 0,10–0,65 м/хв;

- в зв'язних ґрунтах для діапазону діаметра 0,5–1,1 м – діапазон швидкості підйому 0,10–0,45 м/хв;

- закономірність "чим вище швидкість – тим менше діаметр" відноситься до всіх типів ґрунту;

- для однакових діаметрів, наприклад, 0,9 м в пісках швидкість підйому буде 0,37 м/хв, в гравії – 0,40 м/хв, а для створення колони такого діаметру в зв'язних ґрунтах часу на виконання буде затрачено більше: в суглинку швидкість підйому – 0,23 см/хв, а в супіску – 0,17 см/хв. Або в перерахунку на час виконання 1 метра погонного ґрунтоцементної колони: в пісках – 2,7 хв, в гравії – 2,5 хв, в суглинку – 4,4 хв, в супіску – 6,0 хв - для зв'язних ґрунтів часу на виконання буде витрачено в два рази більше.

Після апроксимації даних були побудовані наступні залежності:

Для незв'язних ґрунтів криві залежності діаметра від швидкості підняття наступні:

- для піску $y = 0,3184x^{-1.586}$, або $V_{\text{під}} = 0,3184 \cdot D^{-1.586}$;
- для гравію $y = 0,3442x^{-1.54}$, або $V_{\text{під}} = 0,3442 \cdot D^{-1.54}$.

Для **зв'язних ґрунтів** криві залежності діаметра від швидкості підняття:

- для суглинку $y = 0,1607x^{-1.027}$, або $V_{\text{під}} = 0,1607 \cdot D^{-1.027}$;
- для супіску $y = 0,1993x^{-0.913}$, або $V_{\text{під}} = 0,1993 \cdot D^{-0.913}$.

де y , $V_{\text{під}}$ – швидкість підняття інструменту, м/хв, x , D – діаметр ґрунтоцементної колони, м.

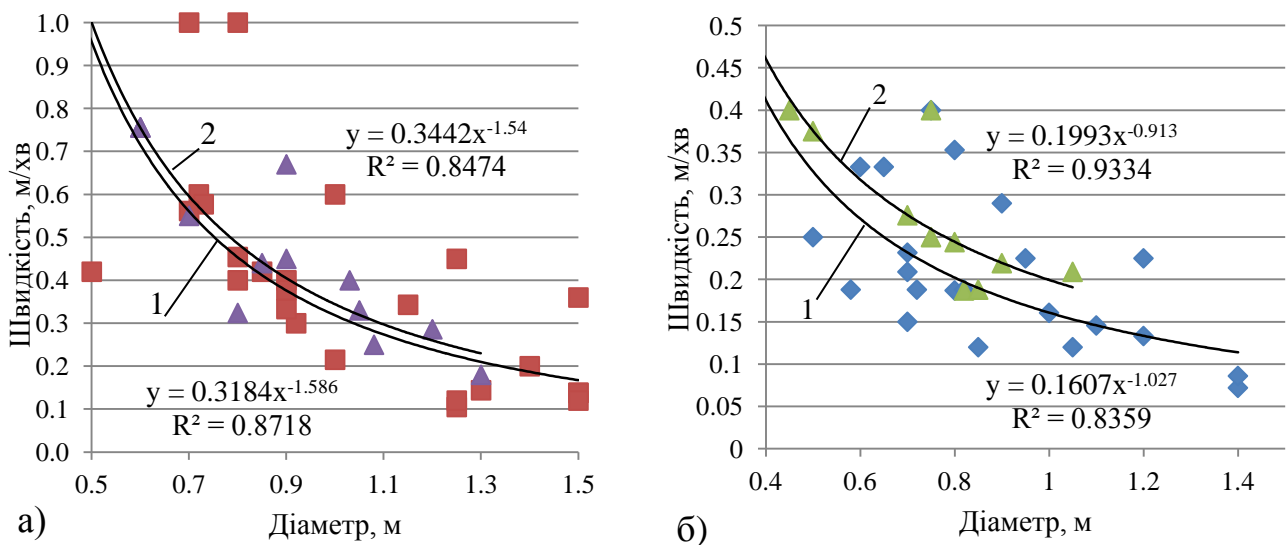


Рисунок 3 – Залежність діаметра ґрунтоцементної колони від швидкості підняття гідромонітора: а) в незв'язних ґрунтах (1-пісок, 2-гравій), б) в зв'язних ґрунтах (1-суглинок, 2-супісок)

Отримані графіки не тільки узагальнюють залежність між геометричною характеристикою ґрунтоцементної колони і технологічним параметром, але і дозволяють полегшити підхід до вибору робочих параметрів бурового інструменту.

Під час обробки та аналізу практичних даних отримано залежності "енергія струменя – діаметр" (рис. 4), що не збігаються з описаними раніше в літературі і наукових працях.

Для **незв'язних ґрунтів** криві залежності діаметра від енергії струменя цементного розчину наступні:

- для піску $y = e^{0.0271x}$, або $E_{\text{стр}} = e^{0.0271 \cdot D}$;
- для гравію $y = e^{0.0281x}$, або $E_{\text{стр}} = e^{0.0281 \cdot D}$.

Для **зв'язних ґрунтів** криві залежності діаметра від енергії струменя цементного розчину:

- для суглинку $y = e^{0.0358x}$, або $E_{\text{стр}} = e^{0.0358 \cdot D}$;
- для супіску $y = e^{0.0343x}$, або $E_{\text{стр}} = e^{0.0343 \cdot D}$;

де y , $E_{\text{стр}}$ – енергія струменя цементного розчину, МДж/м, x , D – діаметр ґрунтоцементної колони, м.

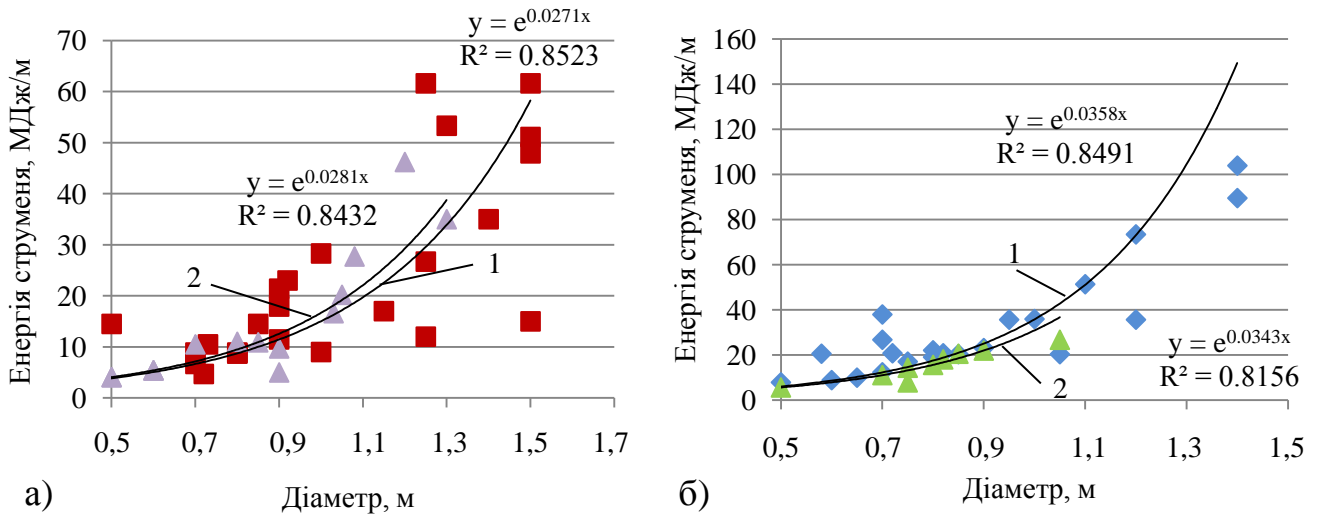


Рисунок 4 – Залежність діаметра ґрунтоцементної колони від енергії струменя цементного розчину: а) в незв'язних ґрунтах (1-пісок, 2-гравій), б) в зв'язних ґрунтах (1-суглинок, 2-супісок)

Практичне значення отриманих залежностей перевірено на прикладі виконаного будівельного об'єкта.

Для порівняння використання побудованих кривих залежності енергії струменя від діаметру ґрунтоцементної колони в різних типах ґрунтів виконано розрахунки для різних об'єктів, що в свою чергу, дозволило ввести *коригуючі коефіцієнти*: для пісків та супісків – 0,80, для суглиноків – 0,9.

На основі отриманих залежностей технологічних параметрів від діаметру ґрунтоцементної колони розроблено методику визначення діаметра в залежності від типу ґрунту, тиску струменя, швидкості підйому гідромонітору та витрат цементного розчину.

Розроблена в дисертаційній роботі методика дозволить проєктувати підсилення ґрунтових масивів без натурних випробувань та експериментальних досліджень.

У **другому розділі** наведено експериментальні дослідження ґрунтоцементного матеріалу та впливу на оточуючий ґрунт під час виконання струменево-цементацийних елементів.

Проведено експериментальні дослідження чотирьох об'єктів на території України в різних ґрунтових умовах. Для дослідження впливу на оточуюче ґрунтове середовище на трьох об'єктах відібрано ґрунтові зразки з наступним визначенням фізико-механічних характеристик (рис. 5). Для вивчення зміни міцнісних характеристик ґрунтоцементного матеріалу колон струменевої цементации на чотирьох дослідних майданчиках відібрано зразки матеріалу з подальшим випробуванням їх на стиск.

За результатами досліджень отримано наступне (табл. 1, табл. 2):

Струменево-цементацийні елементи, що виконані в **заторфованих суглинках**:

- максимальна зона впливу високонапірного струменя на оточуючий ґрунт – 15 см;
- максимальне збільшення щільності ґрунту після впливу на нього високонапірного струменя розчину складо 16 %, мінімальне – 4 %, питоме зчеплення збільшилось на 5...47 %;
- значення міцності на стиск ґрунтоцементного матеріалу – 3,7; 6,5; 6,7 МПа.

Струменево-цементацийні елементи, які виконані в *лесових сугнісках*:

- максимальна зона впливу на навколишній ґрунтовий масив – 10 см;
- зміна фізико-механічних характеристик зразків в зоні впливу: питоме зчеплення збільшилося на 13 %, кут внутрішнього тертя збільшився на 11 %, модуль деформації ґрунту збільшився на 50 %, знизилась значення просідання ґрунту;
- значення міцності на стиск ґрунтоцементного матеріалу – 3,6...12,3 МПа.

Струменево-цементацийні елементи, що виконані в *сугніску пилуватому*:

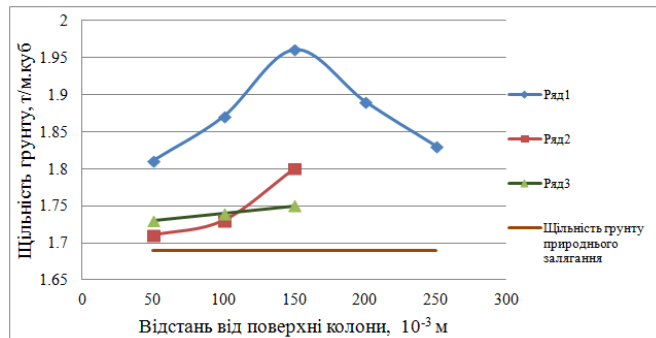
- зони максимального впливу на навколишній ґрунтовий масив 15 і 30 см;
- в міжколонному просторі простежується ущільнення ґрунту на значення в діапазоні від 4 до 8 %;
- міцність на стиск ґрунтоцементного матеріалу – 10,2...14,3 МПа.

Струменево-цементацийні елементи, виконані в *техногенних ґрунтах, шлаках доменного виробництва*:

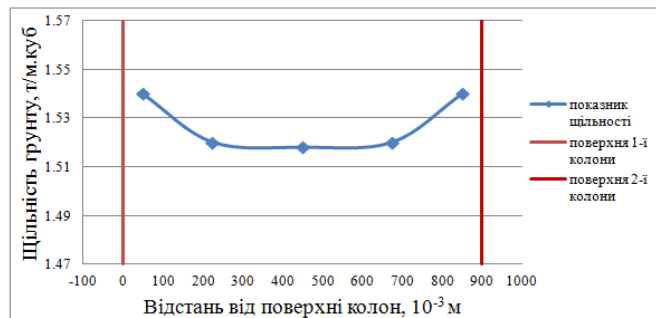
- мінімальна міцність цементно-шлакового матеріалу за результатами лабораторного випробування становить 7,3 МПа, максимальна – 11,2 МПа.

Ґрунтуючись на дослідних даних виконання ґрунтоцементних елементів в різних інженерно-геологічних умовах на території України проведено порівняльний аналіз отриманих значень міцності на стиск (табл. 2). Отримані

а)



б)



в)

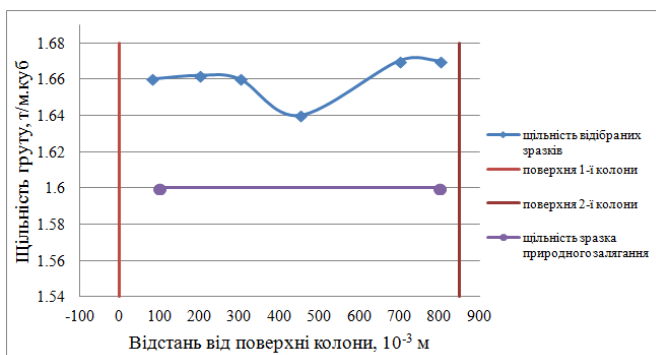


Рисунок 5 – Зміна значень щільності ґрунту між двома колонами струменевого ін'єктування в: а) заторфованих сугнісках, б) сугнісках лесових, в) сугнісках пилуватих твердих

значення в подальшому дозволять використовувати значення міцності під час проєктування конструкцій з використанням ґрунтоцементних елементів.

Таблиця 1 – Порівняння характеристик ґрунтових зразків з різних об'єктів

№, n/n	Тип ґрунту		Фізико-механічні характеристики ґрунту та їх зміна				Визначена зона впливу
			γ , т/м ³	c, кПа	ϕ , град	E, МПа	
1	Суглинок м'якопластичний заторфований (об'єкт "Будівля банку Універсальний", м. Львів)	до виконання	1,69	19	6	-	25 см (макс. вплив – 15 см)
		приріст	+4...16%	+5...47%	+33...216%	-	
		після виконання	1,75...1,96	20..28	8...19	-	
2	Супісок лесовий, просідний (об'єкт "Будівля Лейпциг", м. Київ)	до виконання	-	-	-	-	10 см
		приріст*	+2%	+13%	+11%	+50%	
		після виконання	1,52...1,54	7,5...8,5	26,5...29,5	4..6	
3	Супісок пилуватий твердий (об'єкт "Андріївська церква", м. Київ)	до виконання	1,60	35	24	-	15 та 30 см
		приріст	+4...8%	-	-	-	
		після виконання	1,64...1,72	-	-	-	

* приріст між максимальним та мінімальним значеннями в зоні впливу

Таблиця 2 – Діапазони значень міцності на стиск ґрунтоцементного матеріалу за результатами досліджень автора

№, n/n	Тип ґрунту	Фізико-механічні характеристики ґрунту			Міцність на стиск ґрунтоцементного матеріалу, МПа
		γ , т/м ³	c, кПа	ϕ , град	
1	Делювіально-зсувні піщані ґрунти (об'єкт на пр. Шевченка, м. Київ)	1,84	8	18	11,9...23,8
2	Суглинок м'якопластичний заторфований (об'єкт "Будівля банку Універсальний", м. Львів)	1,69	19	6	3,7...6,7
3	Супісок лесовий, просідний (об'єкт "Будівля Лейпциг", м. Київ)	1,65	10	22	4,2...12,6
4	Супісок пилуватий твердий (об'єкт "Андріївська церква", м. Київ)	1,60	35	24	10,2...14,3
5	Шлаки насипні доменного виробництва (реконструкція в м. Єнакієве)	1,85	2	36	4,8...11,2

Аналізом дослідних даних доведено зміну фізико-механічних властивостей ґрунту, який оточує струменево-цементацийний елемент, та показано графічно наявність зони ґрунту з покращеними характеристиками.

Дослідні дані з формування зони ґрунту з покращеними характеристиками навколо виконаної ґрунтоцементної колони спростовують

висловлювання деяких авторів про відсутність впливу високонапірного струменя на оточуюче ґрунтове середовище за межами радіуса розмиву. Даний факт, в свою чергу, дає підставу для вирішення наступного завдання дисертаційної роботи – моделювання впливу високонапірного струменя на оточуюче середовище з різними типами ґрунтів.

Для числового моделювання утворення в ґрунтових масивах зон з поліпшеними фізико-механічними характеристиками виконано гідравлічний розрахунок затопленого струменя цементного розчину. Користуючись дослідними даними описаних будівельних майданчиків та знаючи руйнуючий радіус струменя, розраховано залишковий тиск, що спричиняє високонапірний струмінь цементного розчину на оточуючий ґрунтовий масив після того, як руйнуючу енергію буде витрачено на руйнування та винесення ґрунту в процесі формування ґрунтоцементної колони.

Отримані розрахункові дані залишкового тиску використано для створення моделі в програмному комплексі Plaxis 3D Foundation.

У відповідності до дослідних даних максимальне значення зони впливу на оточуюче ґрунтове середовище становило 30 см (об'єкт "Реконструкція Андріївської церкви"), під час моделювання отримане максимальне значення - 29,5 см (рис. 6).

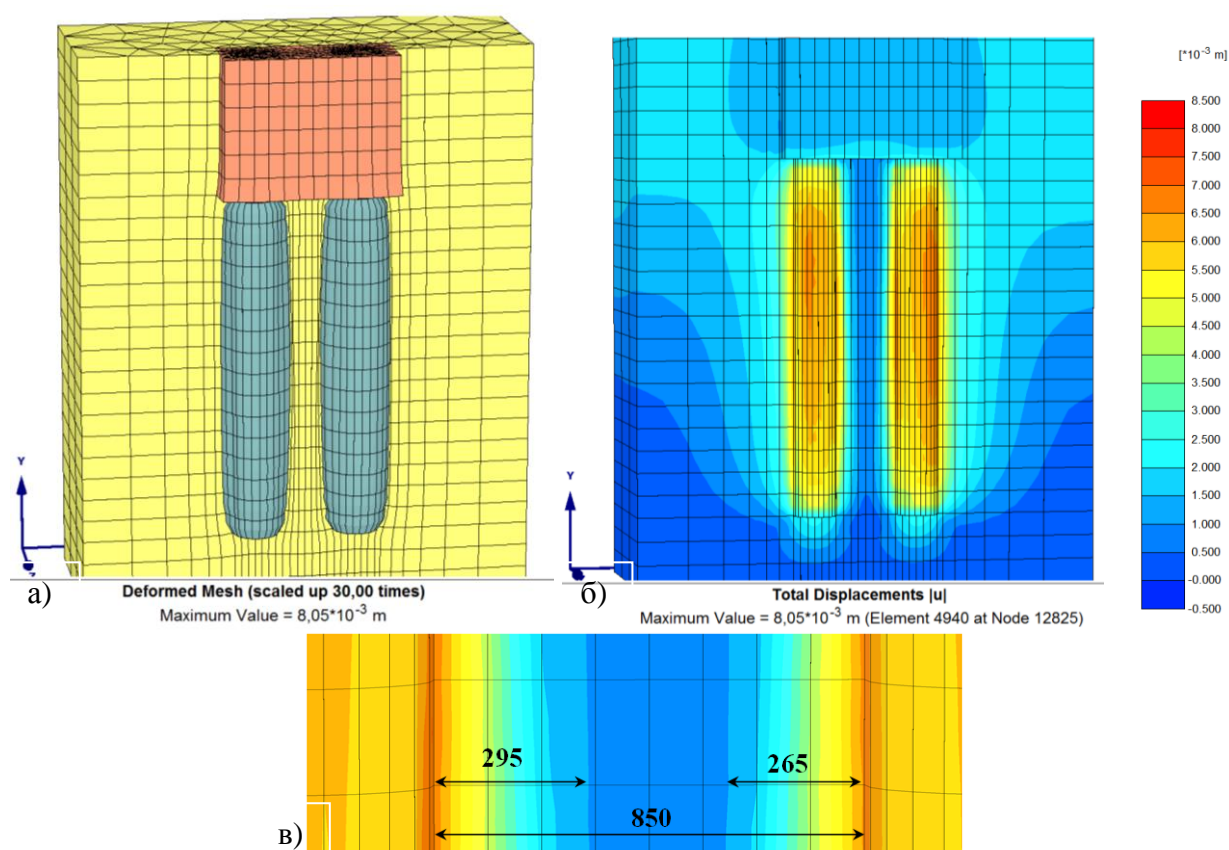
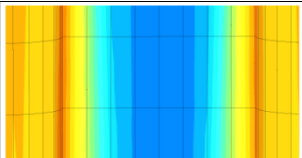
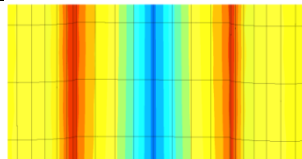
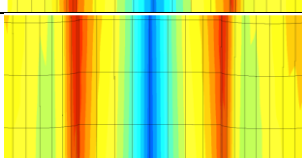
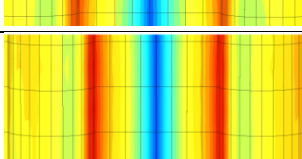
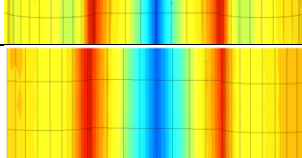
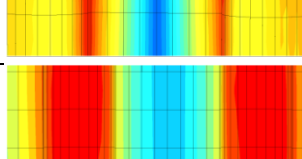
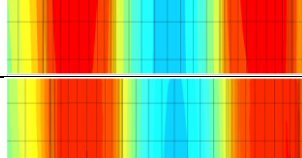


Рисунок 6 – Моделювання впливу високонапірного струменя цементного розчину під час виконання ґрунтоцементного елемента: а), б) ґрунтоцементні колони, в) розмір зон впливу

В результаті моделювання впливу влаштування ґрунтоцементних колон отримано значення зміни щільності ґрунту із зони впливу – $1,65 \text{ т/м}^3$ (до впливу струменя – $1,60 \text{ т/м}^3$), що відповідає дослідним даним (зміна щільності ґрунту в міжколонному просторі після виконання ґрунтоцементних колон на будівельному майданчику варіювалась від $1,64$ до $1,67 \text{ т/м}^3$).

В результаті моделювання та аналізу отриманих даних відмічено, що найбільший вплив на оточуючий ґрунт при виконанні ґрунтоцементної колони за струменевою технологією отримано в пісках середньої щільності – $37,5 \text{ см}$. Максимальні переміщення в пісках середньої щільності – 15 мм , а мінімальні в глинах твердих та суглинках твердої консистенції – $1\text{--}2 \text{ мм}$ (табл. 3).

Таблиця 3 – Результати моделювання зон впливу високонапірного струменя в різних типах ґрунтів

Ґрунт	Характеристики ґрунту	Розрахункова модель	Максимальне переміщення, мм	Максимальна зона впливу, мм
Супісок твердий	$\gamma=1,6 \text{ т/м}^3$, $\phi=23^\circ$, $c=33 \text{ кПа}$, $E=17 \text{ МПа}$		8	295
Супісок пілуватий пластичної консистенції	$\gamma=1,8 \text{ т/м}^3$, $\phi=23^\circ$, $c=13 \text{ кПа}$, $E=12 \text{ МПа}$		12	360
Пісок пілуватий середньої щільності	$\gamma=1,65 \text{ т/м}^3$, $\phi=26^\circ$, $c=2 \text{ кПа}$, $E=11 \text{ МПа}$		15	375
Пісок мілкий щільний	$\gamma=1,61 \text{ т/м}^3$, $\phi=30^\circ$, $c=8 \text{ кПа}$, $E=20 \text{ МПа}$		8	365
Суглинок м'якопластичний легкий	$\gamma=1,92 \text{ т/м}^3$, $\phi=14^\circ$, $c=20 \text{ кПа}$, $E=12 \text{ МПа}$		10	360
Суглинок пілуватий твердої консистенції	$\gamma=1,94 \text{ т/м}^3$, $\phi=23^\circ$, $c=73 \text{ кПа}$, $E=23 \text{ МПа}$		2	270
Глина твердої консистенції	$\gamma=1,96 \text{ т/м}^3$, $\phi=18^\circ$, $c=178 \text{ кПа}$, $E=75 \text{ МПа}$		1	150

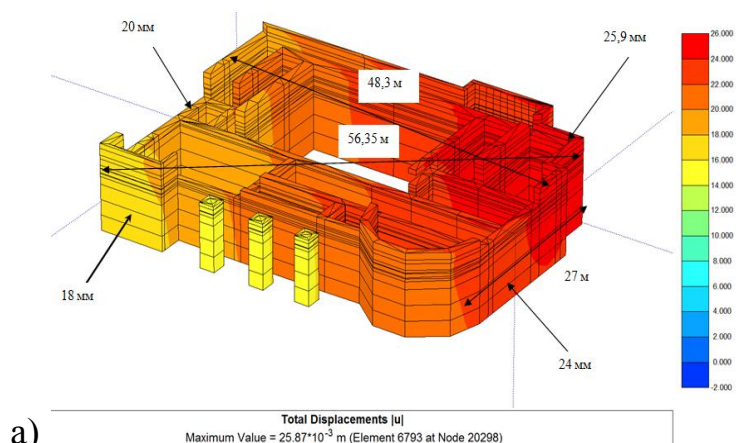
Аналізуючи отримані результати, зроблено висновок, що незважаючи на повідомлення деяких авторів про відсутність впливу високонапірного струменя за межами сформованої ґрунтоцементної колони, даною роботою доведено експериментально та шляхом моделювання, що в різних ґрунтових умовах зона ґрунту з поліпшеними фізико-механічними характеристиками в міжколонному просторі варіюється від 10 до 30 см.

На розрахунковій моделі підсилення ґрунтової основи існуючої будівлі показано покращуючий ефект введення зони ґрунту з поліпшеними характеристиками (рис. 7), що дало змогу зменшити проєктну кількість ґрунтоцементних колон на 15 % та зменшити витрати матеріалів на виконання струменево-цементацийних елементів, що дасть суттєве зниження вартості будівельних робіт.

Вивчаючи застосування технології струменевої цементації в різних типах ґрунтів на території України дослідними даними в роботі підтверджено вдале використання ґрунтоцементних елементів для армування ґрунтових масивів та доведено наявність і параметри зон ґрунту з покращеними характеристиками навколо струменево-цементацийних колон.

Розглянутий широкий діапазон ґрунтів не включає в себе скельні та напівскельні ґрунти, оскільки виконання в них ґрунтоцементних елементів за струменевою технологією є проблематичним. Потужності високонапірного струменя цементного розчину недостатньо для формування ґрунтоцементних елементів заданих геометричних параметрів. В таких будівельних умовах постає питання поєднання геотехнологій, що досліджено в четвертому розділі.

В четвертому розділі розглянуто моделювання підсилення основи нового багатоповерхового будинку, де під час проєктування фундаментів не були враховані всі особливості складної інженерно-геологічної будови



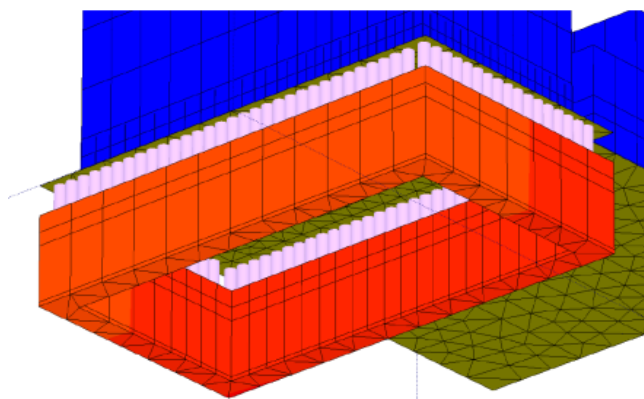
а)

б)

№	Модель	Осідання фундаментів, мм
1	Моделювання <u>до виконання підсилення</u>	128
2	<u>Підсилення фундаментів ґрунтоцементними колонами</u>	26
3	Зменшення кількості ґрунтоцементних колон на 15 % <u>без введення зони ґрунту з покращеними характеристиками</u>	56
4	Зменшення кількості ґрунтоцементних колон на 15 % <u>з введенням зони ґрунту з покращеними характеристиками</u>	39

Рисунок 7 – Моделювання підсилення ґрунтоцементними колонами: а) модель, б) таблиця результатів розрахунку

грунтової основи. В розглянутих умовах, а саме за наявності напівскельного ґрунту в основі будівлі, підсилення тільки ґрунтоцементними колонами не вирішує всіх поставлених задач. В роботі показано спільну роботу елементів підсилення, виконаних за двома різними технологіями (анкерні елементи типу Ischebeck Titan і ґрунтоцементні колони, виконані за струменево-цементацийною технологією), де в роботу елементів підсилення включено шар вапняку, розташований в основі.



а)

№	Модель	Значення переміщення при різних видах навантаження, мм		
		Існуючі умови – навантаження від будівлі	Зрушуюче навантаження по вісі Z	Зрушуюче навантаження по вісі X
1	Існуючі умови	136	144	144
2	Підсилення основи будівлі ґрунтоцементними колонами	96	125	130
3	Підсилення ґрунтової основи складно-компонентними системами	96	120	122

б)

Рисунок 8 – Розрахункова модель підсилення будівлі складно-компонентними системами:

а) підсилення складно-компонентними елементами, б) таблиця результатів моделювання

мінімальний динамічний вплив під час здійснення робіт та можливість виконання підсилюючих елементів в надскладних стиснених умовах;

- ґрунтоцементні елементи у вигляді колон створили під шаром вапняку додаткову підпору по периметру фундаменту, а анкерні елементи типу Ischebeck Titan зв'язали фундаментну плиту будівлі і нижній шар вапняку в один двошаровий масив підвищеної жорсткості, що працює спільно;

Поєднання двох технологій дало можливість створити складно-компонентний елемент підсилення. Під час виконання розрахунків до моделі будівлі були прикладені не тільки навантаження від споруди, а і навантаження, що моделюють зрушуючі зусилля при сейсмічному впливі, що дало змогу в повному обсязі оцінити позитивні аспекти комбінування двох технологій (рис. 8).

Під час розробки моделі кінцевих елементів розглянуто та обґрунтовано питання вибору і застосування розрахункових моделей для таких матеріалів як ґрунтоцемент, вапняк та інші ґрунти основи.

Що дозволяє зробити наступні висновки:

– основною перевагою обраних технологій є

- підйом робочого інструменту під час виконання струменево-цементацийних елементів зі збереженням робочих параметрів забезпечить додаткове ін'єктування тріщинуватого шару вапняку;
- виконання ґрунтоцементних елементів на глибині унеможливилює їх армування, але анкерні елементи типу Ischebeck Titan не тільки зв'язують фундаментну плиту з шаром вапняку, але й армують ґрунтоцементну колону на глибину 2 м;
- за результатами моделювання максимальні осідання висотної будівлі зменшилися на 30 % після виконаного підсилення;
- покращений складний фундамент будівлі мінімізує можливість виникнення наднормативного крену за дії зрушуючих зусиль в складних інженерно-геологічних умовах.

Запропонована методика поєднання двох геотехнологій дозволить забезпечувати сумісну роботу елементів двох різних технологій при підсиленні існуючих будівель в сейсмічних районах з забезпеченням більшої ефективності підсилення.

Розрахунок очікуваного економічного ефекту від впровадження одержаних у дисертаційній роботі результатів з врахування зон ґрунту з покращеними характеристиками при виконанні ґрунтоцементних колон за струменево-цементацийною технологією дозволив забезпечити економічний ефект в розмірі 484 743 грн. (рис. 9).

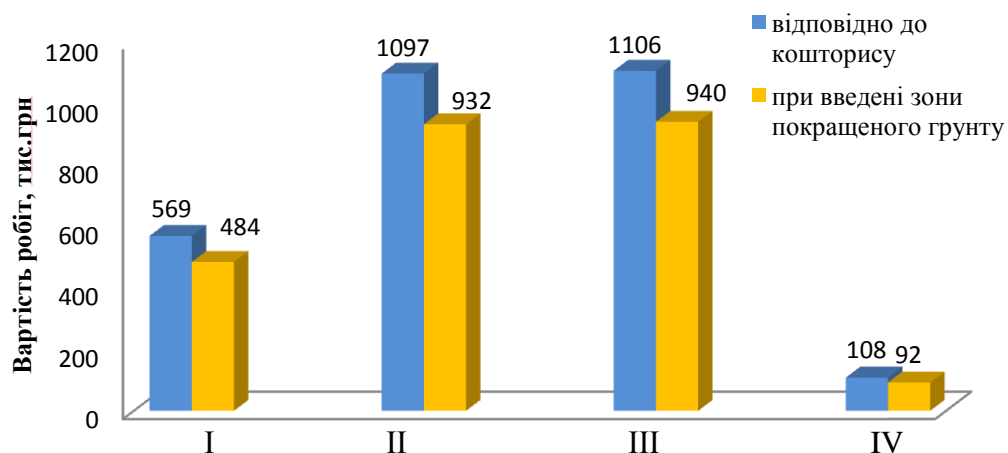


Рисунок 9 – Економічне обґрунтування врахування зон ґрунту з покращеними характеристиками під час виконання підсилення ґрунтової основи існуючої будівлі. Статті витрат: I – буріння свердловин Ø125 мм, II – ін'єктування свердловин цементним розчином, III – портландцемент М400, IV – перевезення пульпи та ґрунту.

Термін виконання робіт зменшується відповідно до зменшення кількості необхідних ґрунтоцементних колон: при повному терміні робіт в 2 місяці економія часу склала 10 днів. Цей факт дозволить зменшити витрати праці робітників, роботу бурових машин та іншого будівельного обладнання, витрати на паливо та час роботи людей, що працюють на обслуговуванні машин.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій виконано дослідження з вдосконалення технологічних параметрів струменевої технології з урахуванням геотехнічних характеристик масиву. У процесі роботи над дисертаційним дослідженням досягнуто його мету, виконано всі поставлені завдання та отримано такі основні науково-практичні результати:

1. На основі дослідних даних було виконано аналіз взаємозв'язку режимів та технологічних параметрів струменевої цементації від діаметра ґрунтоцементної колони в різних типах ґрунтів, отримано залежності швидкості підйому від діаметра ґрунтоцементної колони. Отримані результати дозволяють полегшити підхід до вибору робочих параметрів бурового інструменту.

2. Встановлено експоненціальну залежність між енергією струменя та отриманим діаметром колони, на основі якої розроблено методику його визначення для різних типів ґрунтів, тиску струменя, швидкості підйому гідромонітору та витрат цементного розчину.

3. На основі порівняльного аналізу результатів експериментальних і теоретичних досліджень встановлено поправочні коефіцієнти для співвідношення розрахункового та фактичного діаметрів колони, які складають для піску і супіску $K=0,8$, для суглинку $K=0,9$, що дозволяє визначити реальний діаметр ґрунтоцементної колони в різних інженерно-геологічних умовах.

4. Експериментальним шляхом доведено покращення фізико-механічних властивостей масиву, оточуючого струменево-цементацийний елемент, доведено експериментальним та шляхом моделювання, що в різних ґрунтових умовах зона ґрунту з поліпшеними фізико-механічними характеристиками варіюється від 10 до 30 см.

5. На розрахунковій моделі підсилення ґрунтової основи доведено покращуючий ефект врахування зони поліпшеного ґрунту, що дало змогу зменшити в проекті кількість ґрунтоцементних колон та витрату матеріалів на 15 %.

6. Для складних інженерно-геологічних умов розроблено метод підсилення ґрунтових основ складно-компонентними системами, що складаються з елементів двох геотехнологій – анкерних елементів типу Ischebeck Titan та ґрунтоцементних колон, виконаних за струменевою технологією.

7. Застосування розробленої методики врахування зони покращеного ґрунту при виконанні підсилення основи будівлі ґрунтоцементними колонами дозволило забезпечити економічний ефект в розмірі 484 743 грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях:

1. Губашова В.Е. Применение технологии струйного инъекирования в качестве противофильтрационных мероприятий при возведении ограждающих конструкций глубоких выемок в условиях плотной застройки. *Світ геотехніки*. 2011. №4. С. 19-21.

2. Зуевская Н.В., Дворник С.А., Губашова В.Е., Волык Ю.В. Использование метода струйной цементации (струйного инъекирования) грунтов при усилении фундаментов в сложных геологических процессах. *Вісник Криворізького Технічного Університету*. Кривий Ріг, 2011. Випуск 27. С.262-265.

Особистий внесок здобувача: дослідження застосування струменевої цементації для підсилення ґрунтових основ фундаментів існуючих будівель.

3. Зуєвська Н.В., Губашова В.Є., Шайдецька Л.В. Особливості врахування впливу будівельної техніки на стійкість конструкції котловану при щільній міській забудові. *Збірник наукових праць НГУ.-Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»*. 2018. №54. С.170-183. (включено до баз даних «Google Scholar, Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського»).

Особистий внесок здобувача: застосування геотехнічних розрахункових комплексів для виконання моделювання та дослідження напружено-деформованого стану масиву та впливу на елементи огороження.

4. Зуєвська Н.В., Шайдецька Л.В., Губашова В.Є. Вплив виконання елементів струменевої цементації на фізико-механічні характеристики навколишнього ґрунтового масиву. *Науковий журнал "Енергетика: економія, технології, екологія"*. Київ, 2019. №4. С. 27-34 (включено до баз даних «Google Scholar, Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського») DOI:<https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2019.200474>

Особистий внесок здобувача: дослідження впливу високонапірного струменя на зміну фізико-механічних характеристик ґрунтів при виконанні ґрунтоцементних колон за струменевою геотехнологією.

5. Зуєвська Н.В., Шайдецька Л.В., Губашова В.Є. Особливості формування елементів струменевої цементації в заторфованому суглинку. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія "Технічні науки"*. Київ, 2020. Том 31 (70), №2. С. 198-202. (включено до баз даних «Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського»)

Особистий внесок здобувача: дослідження особливостей формування ґрунтоцементних колон в заторфованих суглинках.

6. Губашова В.Є. Experience of carrying out of ground-cement elements on the jet grouting technology in slags of a blast-furnace process (Досвід виконання ґрунтоцементних елементів по технології струменевої цементації в шлаках доменного виробництва). *Науково-технічний журнал "Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві"*. Вінниця, 2019. Том 27 №2. с. 87-95.

(включено до баз даних «Google Scholar, Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського») DOI:<https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-87-95>

7. Зуєвська Н.В., Губашова В.Є. Моделювання підсилення ґрунтової основи складно-компонентними системами. *Вісті Донецького гірничого інституту*. м. Покровськ, 2020. №1 (46). С. 36-44 (включено до баз даних «Google Scholar, Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського, Index Copernicus International»).

Особистий внесок здобувача: моделювання підсилення ґрунтової основи складно-компонентними системами (комбінування ґрунтоцементних колон та анкерних паль).

8. Зуєвська Н.В., Губашова В.Є. Стабілізація ґрунтового масиву за допомогою ін'єкційних анкерів. Порівняльний аналіз особливостей проектування. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету "Дніпровська Політехніка"* Дніпро, 2020. №60-06. С. 58-68 (включено до баз даних «Google Scholar, Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського».) DOI:<https://doi.org/10.33271/crpnmu/60.058>

Особистий внесок здобувача: аналіз проектних підходів та моделювання ін'єкційної частини ґрунтового анкера з подальшим дослідженням напружено-деформованого стану ґрунтового масиву за допомогою геотехнічного розрахункового комплексу.

У закордонних збірниках наукових праць інших держав, які входять до ОЕСР та Європейського Союзу:

9. Gubashova V. Experience of performance of the horizontal anti-filtration screen with the application of double fluid jet grouting. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*, Poland, 2020. №1(53). p. 28-34 (включено до баз даних «Google Scholar, Index Copernicus International (Республіка Польща) Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU, Academic resource index ResearchBib, International Scientific Indexing (ISI), Slideshare, Cosmos Foundation».)

У закордонних періодичних виданнях:

10. Зуевская Н.В., Губашова В.Е. Обзор технологии струйной цементации и ее применение в городском строительстве. *Elmi-nəzəri jurnal "Yer Və İnsan"*. Azerbaijan, 2020. №01 (13). p.67-72.

Особистий внесок здобувача: дослідження застосування струменевої геотехнології для рішення різноманітних задач в міському будівництві.

У інших науково-технічних виданнях:

11. Губашова В.Е. Применение технологии струйного инъекирования в качестве противотфильтрационных мероприятий при возведении ограждающих конструкций. *Міжвідомчий науково-технічний збірник "Будівельні конструкції"*. Київ, 2011. №75. Книга 2. С.635-642.

Публікації за матеріалами конференцій:

12. Зуевская Н.В., Дворник С.А., Губашова В.Е., Волык Ю.В. Изменение напряженно-деформируемого состояния грунтов при устройстве глубоких выемок. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези доповідей 71 Міжнародної науково-технічної конференції*, м. Дніпропетровськ, 2011. С.231-232.

Особистий внесок здобувача: вивчення та дослідження зміни напружено-деформованого стану ґрунтового масиву при глибоких виїмках за допомогою програмного комплексу на основі методу кінцевих елементів.

13. Губашова В.Е. Сравнение геотехнических расчетных комплексов на примере расчета ограждения котлована в г. Киеве. *Геотехника Беларуси: наука и практика: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию кафедры оснований, фундаментов и инженерной геологии и 90-летию со дня рождения профессора Юрия Александровича Соболевского* (Минск, 23–25 октября 2013 г.). В 2 ч. Ч. 1. Минск : БНТУ, 2013. С. 212-219.

АНОТАЦІЯ

Губашова В. Є. Обґрунтування раціональних технологічних параметрів струменевої цементації в складних геотехнічних умовах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.09 – "Геотехнічна і гірнича механіка". – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, 2021.

Дисертація присвячена обґрунтуванню раціональних технологічних параметрів струменевої цементації в складних геотехнічних умовах. В роботі досліджено та встановлено взаємозв'язки технологічних параметрів струменевої цементації з діаметром ґрунтоцементної колони в різних типах ґрунтів. На основі отриманих експоненціальних залежностей діаметра ґрунтоцементного елемента круглого перерізу від енергії високонапірного струменя цементного розчину розроблено методику розрахунку діаметра струменево-цементацийної колони. В процесі дослідження експериментальним шляхом доведено змінення фізико-механічних властивостей ґрунту, що оточує ґрунтоцементний елемент під час його виконання за струменевою технологією. На підставі математичного моделювання визначено закономірності формування в ґрунтових масивах зон з поліпшеними фізико-механічними параметрами в міжколонному просторі в різних типах ґрунтів. Удосконалено методику комп'ютерного моделювання управління напружено-деформованим станом основи будівлі під час її підсилення струменево-цементацийними елементами з урахуванням складних геотехнічних умов.

Ключові слова: струменева цементація, складні геотехнічні умови, напружено-деформований стан, технологічні параметри, ґрунтоцементний

елемент, міцність на стиск, зона покращеного ґрунту, складно-компонентний елемент.

АННОТАЦИЯ

Губашова В. Е. Обоснование рациональных технологических параметров струйной цементации в сложных геотехнических условиях. - Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.09 – "Геотехническая и горная механика". – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, 2021.

Диссертация посвящена обоснованию рациональных технологических параметров струйной цементации в сложных геотехнических условиях.

В работе исследованы и установлены взаимосвязи технологических параметров струйной цементации с диаметром грунтоцементной колонны в различных типах грунтов. На основе полученных экспоненциальных зависимостей диаметра грунтоцементного элемента круглого сечения от энергии высоконапорной струи цементного раствора разработана методика расчета диаметра струйно-цементационной колонны. В процессе исследования экспериментальным путем доказано изменение физико-механических свойств грунтов, окружающих грунтоцементный элемент, во время его выполнения по струйной технологии. На основании математического моделирования определены закономерности формирования в грунтовых массивах зон с улучшенными физико-механическими параметрами в межколонном пространстве в различных типах грунтов. Усовершенствована методика компьютерного моделирования управления напряженно-деформированным состоянием основания здания во время его усиления струйно-цементационными элементами с учетом сложных геотехнических условий.

Ключевые слова: струйная цементация, сложные геотехнические условия, напряженно-деформированное состояние, технологические параметры, грунтоцементный элемент, прочность на сжатие, зона улучшенного грунта, сложно-компонентный элемент.

ANNOTATION

Gubashova V. E. Substantiation of rational technological parameters of jet grouting in difficult geotechnical conditions. - Qualifying scientific work as a manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.15.09 – "Geotechnical and mining mechanics". - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to substantiation of rational technological parameters of jet grouting in difficult geotechnical conditions.

Analysis of previous studies of jet grouting technology has shown that despite the fact that the technology began its development in the 70s of last century, there are still many issues to be explored: the relationship of technological parameters with the characteristics of the soil-cement array, the impact of technological processes on the soil environment, etc.

In the course of work the current state of the normative base concerning designing and execution of soil-cement elements on jet technology is analyzed. It is noted that today on the territory of Ukraine there are almost no regulations that determine the procedure for calculation, design and implementation of jet-grouted elements.

Based on the experimental data the relationship between the technological parameters of jet grouting and the diameter of the soil-cement column in different types of soils is investigated and established. The experimental data are divided according to the type of soils - incoherent and cohesive: sand and gravel, sandy loam and loam. The dependences of the lifting speed on the diameter of the soil-cement column were obtained, which not only generalize the relationship between the geometric characteristics of the soil-cement column and the technological parameter, but also facilitate the approach to choosing the operating parameters of the drilling tool.

The next obtained dependence is the exponential dependence of the jet energy on the obtained column diameter, on the basis of which a method of determining the column diameter depending on soil type, jet pressure, lifting speed of the hydromonitor and cement solution consumption was developed.

Comparative calculations were performed on the basis of completed construction projects, which, in turn, made it possible to introduce correction factors for soil conditions in Ukraine.

The change of physical and mechanical properties of the soil surrounding the jet-grouted element and the presence of a zone of improved soil have been experimentally proved. Experimental data allowed us to investigate the change in the stress-strain state of the soil mass with reinforcement elements made by jet technology with the inclusion of improved soil zones in the calculation.

Based on experimental data of soil-cement elements in different engineering and geological conditions on the territory of Ukraine, a comparative analysis of the results of compressive strength of soil-cement material and a graph with ranges of strength values for different soil conditions. The obtained values of strength can be used in the design of structures using soil-cement elements.

It is proved experimentally and by modeling that in different soil conditions the soil zone with improved physical and mechanical characteristics varies from 10 to 30 cm.

The calculated model of strengthening the soil base of the existing building shows the improving effect of the introduction of the zone of improved soil, which

allowed to reduce the design number of soil-cement columns by 15%. Accordingly, the materials for the execution of jet-grouted elements will be reduced by 15%.

For complex engineering-geological conditions (semi-rocky soils) a method of soil foundation reinforcement with complex-component systems consisting of elements of two geotechnologies - anchor elements of Ischebeck Titan type and soil-cement columns made by jet technology has been developed.

Numerical modeling was performed with the help of Plaxis 3D Foundation high-rise building made of monolithic reinforced concrete, based on a layer of semi-rocky soil - limestone. The paper shows the joint work of reinforcement elements made by two different technologies, where the work of reinforcement elements includes a layer of limestone located in the base. The combination of the two technologies made it possible to create a complex-component element of amplification. When performing calculations, not only the loads from the structure were applied to the building model, but also the loads simulating shifting forces under seismic influences, which allowed to fully assess the positive aspects of combining the two technologies.

On the example of the completed project to strengthen the soil base of a particular object, a comparative analysis of standard cost items in accordance with the estimate for construction work using the developed method of taking into account the area of improved soil when performing soil-cement columns by jet technology. On the basis of the analysis the economic efficiency from application of a technique is proved.

Keywords: jet grouting, complex geotechnical conditions, stress-strain state, technological parameters, soil-cement element, compressive strength, zone of improved soil, complex-component element.

Губашова Валентина Євгенівна

**ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
СТРУМЕНЕВОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ В СКЛАДНИХ ГЕОТЕХНІЧНИХ
УМОВАХ**

Спеціальність 05.15.09 – геотехнічна і гірнича механіка

(Автореферат)